

モデル斜面からの流出について (11)

広島大学工学部 正員 三島 隆明
 広島大学工学部 正員 金丸 昭治
 中電技術コンサルタント 正員 ○ 川本 智博

1. はじめに、一般に、不飽和流出現象についても、流動領域内の単位体積当たりの空隙を大きさの異なる適切な2領域に分割して解析すれば、飽和流動的な解析も可能であることを一部の流出実験結果に基づいて確認した結果は既に発表した通りである。¹⁾

各種の斜面状態における流出に対するこの解析法の適合性を検討するために、更に流動層内の飽和度分布の変化を詳しく検討した結果、流動層内の空隙の小さな部分すなわち透水性の低い部分から順に、それぞれ難透水性部分、低透水性部分、中透水性部分、高透水性部分、空洞部分 (A~E) のように5分割し、各部分は毛管水平衡状態を保ちながら流動するものとして解析する方が、より高い適合性があることがわかった。

本研究では、斜面長と層厚を変化させて行なった屋内雨水流出実験結果と数値解析結果とを比較し、この解析法の妥当性について検討した結果について述べる。

2. 実験装置および実験方法 プラスチック製水路 (長:14.05m、幅:0.30m、深さ:0.65m、勾配:1/6) に真砂土を各種寸法 (斜面長:14.05m, 10.0m, 5.0m、層厚:0.45m, 0.10m)、および状態 (試料の平均空隙率:40.7%) になるように充填したモデル斜面に人工降雨 (強度:5mm/h~40mm/h) を降らせ、流出実験を行なった。実験方法の詳細ならびに試料の特性については文献 1), 2) を参照されたい。

3. 基礎方程式および数値計算式 前述したA~Eの各部分において、A部分は實際上ほとんど飽和しており、中短期の流出には関与しないものとする。また、斜面上に降った雨水は空隙の小さい部分を優先的に浸透し、しかる後に各部分の雨水が、Darcy則に従う飽和流として毛管力によって平衡を保って流動する。すなわち、単位の柱状体空隙について見ると、雨水は、まずB部分に浸透し、この部分が飽和されるとC部分に流入し、C部分で毛管水上昇高が h_{cm} に達するとC、Dの両部分で水位が上昇し、D部分において毛管水上昇高が h_{dm} に達するとE部分が流動を始める。さらに降雨が続くと、各部分で同量ずつ上昇し、B、C、D、Eの順に飽和することになる。

雨水がこのような仮定にしたがって流動するものとして、以下に示すように、各次元量をB部分の透水係数 k_B および斜面長 l を用いて無次元化した (1) 式のような無次元量であらわすと、各状態における無次元の基礎方程式は (2) 式~(8) 式ようになる。

ただし、 f : 斜面表面から測った水深、 h : 水深、 t : 時間、 x : 距離、 d : 層厚、 θ : 斜面傾斜角、 k : 透水係数、 n : 占有率、 α : 減衰係数、 r : 降雨強度、 q : 流量を表わす。また、大文字添字は部分名、小文字添字の d は下流端、 u は上流端、 m は毛管水に関する量を表わす。

$$\begin{aligned} X &= \frac{x}{l}, \quad T = \frac{k_B t}{l}, \quad R = \frac{r}{k_B}, \quad D = \frac{d}{l}, \\ F &= \frac{f}{l}, \quad H_c = \frac{h_c}{l}, \quad H_{cm} = \frac{h_{cm}}{l}, \end{aligned} \quad \left\{ \begin{aligned} n_B \frac{\partial F}{\partial T} + \frac{\partial Q_B}{\partial X} &= R \cos \theta \\ Q_B &= n_B F \cos \theta \left(\tan \theta + \frac{\partial F}{\partial X} \right) \end{aligned} \right. \quad (2) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} H_{dm} &= \frac{h_{dm}}{l}, \quad Q_B = \frac{q_B}{k_B l}, \quad Q_C = \frac{q_C}{k_B l}, \\ Q_D &= \frac{q_D}{k_B l}, \quad \alpha_B' = \frac{\alpha_B l}{k_B}, \quad \alpha_C' = \frac{\alpha_C l}{k_B}, \\ \alpha_D' &= \frac{\alpha_D l}{k_B} \end{aligned} \quad (1) \quad \left\{ \begin{aligned} n_C \frac{\partial H_c}{\partial T} + \frac{\partial Q_C}{\partial X} &= \{ (R \cos \theta \\ &\quad - n_B D \sin \theta) / (1 - X_{cu}) \} / n_C \\ Q_C &= n_C H_c \cos \theta \left(\tan \theta - \frac{\partial H_c}{\partial X} \right) \end{aligned} \right. \quad (4) \quad (5)$$

I) $0 \leq X < X_{cu}$

III) $X_{du} \leq X < 1$

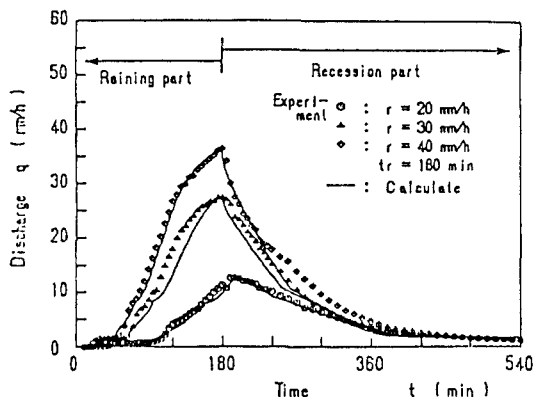


図-1 実測と計算ハイドログラフの比較 I

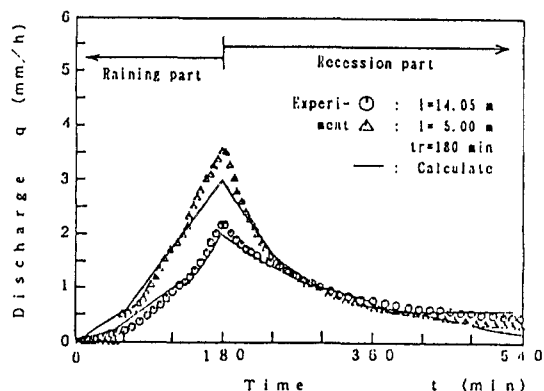


図-2 実測と計算ハイドログラフの比較 II

$$\left\{ \begin{aligned} (n_c + n_d) \frac{\partial H_D}{\partial T} + \frac{\partial}{\partial X} (Q_c + Q_d) \\ = \frac{\{ (R \cos \theta - n_B D \sin \theta) / (1 - X_{cu}) \}}{(n_c + n_d)} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

$$Q_c = n_c H_c \cos \theta \left(\tan \theta - \frac{\partial H_c}{\partial X} \right) \quad (7)$$

$$Q_d = n_d H_D \cos \theta \left(\tan \theta - \frac{\partial H_D}{\partial X} \right) \quad (8)$$

また、各部分の下流端流量は以下のように表される。

$$\left\{ \begin{aligned} F_d < (D - H_{Bm}) : \\ Q_{Bd} &= n_B F_d \cos \theta \left(\tan \theta + \frac{\partial F_d}{\partial X} \right) \quad (9) \\ (D - H_{Bm}) \leq F_d : Q_{Bd} &= n_B F_d \sin \theta \quad (10) \\ Q_{Cd} &= n_c H_{cm} \cos \theta \left(\tan \theta - \frac{\partial H_{cd}}{\partial X} \right) \quad (11) \\ Q_{Dd} &= n_d H_{Dm} \cos \theta \left(\tan \theta - \frac{\partial H_{Dd}}{\partial X} \right) \quad (12) \\ Q_d &= Q_{Bd} + Q_{Cd} + Q_{Dd} \quad (13) \end{aligned} \right.$$

具体的な計算はこれらの各式を陽型前進差分式にして計算することにした。

4. 考察結果 斜面長 $l=14.05\text{m}$ 、および層厚 $d=0.45\text{m}$ のように十分に大きな斜面に、比較的大きな一定強度の降雨を 3 時間降させた場合の実測ならびに計算 (差分間隔 $\Delta x=1/20$, $\Delta T=1/500$) ハイドログラフを比較したものが、図-1 である。

図から分かるように、降雨期および減衰期の双方ともほぼ満足のいく適合性を示しており、特

に降雨期においてはその変化特性が良く表現されている。すなわち、この解析法は、層厚が 0.5m 程度の比較的層厚の厚い斜面からの流出に関しては十分な適合性が有ると言える。

一方、層厚が $d=10\text{cm}$ と比較的層厚の薄い場合について、斜面長が長い場合 ($l=14/05\text{m}$) と短い場合 ($l=5.0\text{m}$) の流出実験結果を示したものが図-2 である。

前述の実験と同様に表面流出を伴わない範囲を対象にした関係上、降雨強度 $r=5\text{mm/h}$ の降雨を 3 時間降させたもので、いずれの場合も小さい流出になるが、前述の方法で計算すると、降雨期にはこの場合も良好な一致を示すのに対して減衰期では計算値の方が若干大きめの値になる。そこで、この減衰期の透水係数が指数関数的に減衰するとして計算してみると、図-2 に見るように、ほぼ一致する。

いずれの場合も、透水係数の減衰係数 $\alpha_B'=0.2$ (ただし、 $K_B'=K_B \exp(-\alpha_B' T)$ 以下同様)、 $\alpha_C'=0.45$ 、 $\alpha_D'=1.0$ となった。

これらのことから、斜面の層厚が薄くなると、透水性の大きい部分ほど影響を受けやすいことがわかる。

5. あとがき 比較的簡便に不飽和流動現象を解析する方法の適合性と問題点の一部が明らかになった。今後、さらに各種の流出状態について検討していく予定である。

参考文献 1) 金丸、三島、上田、市川：第41回、中四講演概要集 pp100~101, 1989
2) 金丸、三島、堀川、松尾：第40回、中四講演概要集 pp98~99, 1988